

УДК 519.6: 536.764

А.И. Ивон, А.А. Андреев, Л.А. Можаровский
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ ДЛЯ
АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ РЕЖИМА ТРОТТЛИНГА
ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРОЦЕССОРА**

Введение. Режим троттлинга (throttling) используется для управления энергопотреблением центрального процессора компьютера и в частности для его защиты от перегрева [1]. В режиме троттлинга тактовый сигнал процессора модулируется таким образом, что за любой достаточно большой по сравнению с его периодом промежутков времени количество „полезных” тактов процессора, в которых выполняется машинный код команд, уменьшается и увеличивается число „холостых” тактов, в течение которых процессор простаивает. Такой режим работы уменьшает загрузку процессора, поскольку он уже не тратит все свои такты на выполнение программного кода, как следствие энергопотребление снижается. Поэтому перевод процессора при возникновении перегрева в режим троттлинга является эффективным средством борьбы с этим негативным явлением. В современных процессорах контроль температуры кристалла осуществляется с помощью термодиода, интегрированного в схему процессора [2]. Когда температура кристалла превышает заданный предел, запускаются программные или аппаратные средства, переводящие процессор в режим троттлинга.

Значительные возможности для борьбы с перегревом процессоров предоставляют критические терморезисторы на основе диоксида ванадия (VO_2) [3]. Такие терморезисторы сочетают свойства датчика температуры и термического реле переключающегося при температуре $\sim 68^\circ C$, близкой к граничным рабочим температурам, составляющим для разных моделей процессоров $80 - 90^\circ C$ [2].

Постановка задачи. В настоящей работе поставлена задача исследовать возможности использования критических терморезисторов на основе VO_2 для аппаратной реализации режима троттлинга центрального процессора компьютера с целью его защиты от перегрева.

© Ивон А.И., Андреев А.А., Можаровский Л.А., 2009

Обоснование полученных результатов. Принципы, заложенные в режиме троттлинга процессора, поясняет рис. 1. Тактирующий сигнал процессора, имеющий частоту f_0 модулируется по амплитуде сигналом с меньшей частотой f и скважностью $Q = T/T_{и}$. Благодаря такой модуляции за период модулирующего сигнала T тактовые сигналы („полезные” такты в которые выполняется программный код) подаются ядру процессора по его внутренней шине только в течение интервала времени $T_{и}$, а в интервале времени $T - T_{и}$ не подаются, то есть процессор не выполняет программный код и эти такты являются „холостыми”.

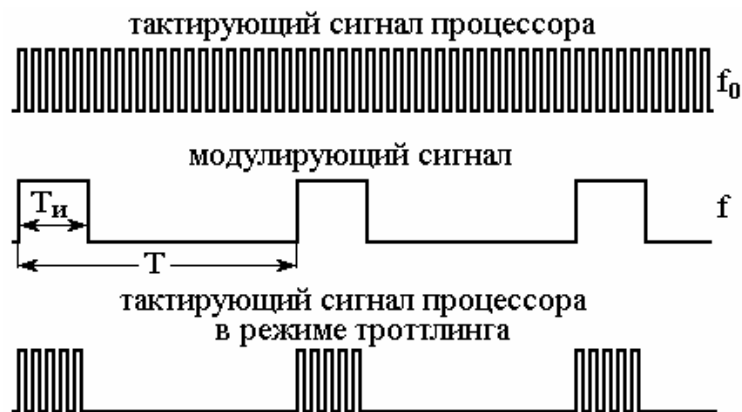


Рисунок 1 – Модуляция тактовой частоты процессора в режиме троттлинга

Уменьшение количества „полезных” тактов процессора в режиме троттлинга эквивалентно снижению тактовой частоты процессора, следствием чего является снижение энергопотребления. Эффективную частоту процессора в режиме троттлинга, называемую „частотой троттлинга” ($f_{тр}$), можно оценить, если учесть, что количество „полезных” тактов за период модулирующего сигнала T равно $f_0 T_{и}$ (рис. 1) и ввести эффективный период тактового сигнала в режиме троттлинга равный $T/(f_0 T_{и})$. В результате для частоты троттлинга получим следующее выражение:

$$f_{тр} = \frac{f_0}{Q}, \quad (1)$$

из которого вытекает, что частота троттлинга, а, следовательно, энергопотребление процессора снижаются с ростом скважности сигнала модулирующего тактирующий сигнал процессора.

Для модуляции тактового сигнала центрального процессора компьютера при борьбе с его перегревом можно использовать делитель напряжения, схема которого показана на рис. 2.

В этом делителе терморезистор R_t на основе VO_2 скачком (не менее чем на два порядка) уменьшает сопротивление, когда нагревается от процессора до температуры фазового перехода металл-полупроводник $T_t \sim 68^\circ\text{C}$.

Как следствие, сигнал высокого уровня напряжения U^1 (логическая „1”) на выходе делителя сменяется сигналом низкого уровня U^0 (логический „0”), который может использоваться для перевода процессора в режим троттлинга. Если сопротивление критического терморезистора

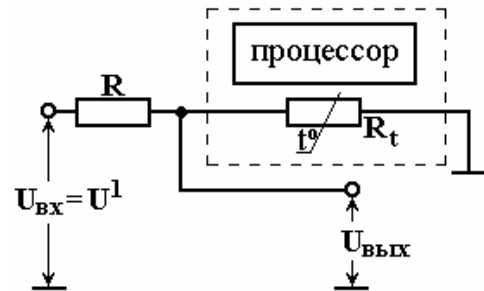


Рисунок 2 – Схема делителя напряжения на критическом терморезисторе

в полупроводниковой фазе VO_2 вблизи температуры фазового перехода T_t равно R_{off} , а выше этой температуры R_{on} , то уровни напряжения на выходе делителя определяются соотношениями:

$$U^1 = \frac{U^1 R_{off}}{R + R_{off}}; \quad U^0 = \frac{U^1 R_{on}}{R + R_{on}}. \quad (2)$$

Для обеспечения необходимого перепада напряжения между уровнями логического нуля и единицы сопротивление резистора R в схеме делителя можно выбрать, как геометрическое среднее сопротивлений R_{off} и R_{on} :

$$R = \sqrt{R_{off} R_{on}}, \quad (3)$$

это обеспечивает следующие уровни напряжения логических сигналов, соответственно, выше и ниже критической температуры $T_t \sim 68^\circ\text{C}$:

$$U^1 = \frac{U^1}{1 + \sqrt{\frac{R_{on}}{R_{off}}}} \approx U^1; \quad U^0 = \frac{U^1 \sqrt{\frac{R_{on}}{R_{off}}}}{1 + \sqrt{\frac{R_{on}}{R_{off}}}} \approx U^1 \sqrt{\frac{R_{on}}{R_{off}}}. \quad (4)$$

Из (4) вытекает, что при обычном для терморезисторов на основе VO_2 отношении сопротивлений $R_{off}/R_{on} \geq 10^2$ [3,4], делитель на

рис. 2, обеспечивает напряжение логического нуля $U^0 \leq 0,1 U^1$, который является типичным для микросхем ТТЛШ и КМОПТЛ используемых в современной цифровой технике.

Критические терморезисторы на основе VO_2 могут быть изготовлены как в пленочном исполнении [4], так и в объемном [3]. Такие терморезисторы в пленочном исполнении, как и термодиоды, могут быть интегрированы непосредственно на кристалле процессора при использовании гибридной технологии изготовления СБИС. Известно, что температура кристалла процессора в области его ядра на $20 - 30^\circ\text{C}$ превышает температуру на корпусе процессора [2], предельное значение которой, как отмечалось выше, составляет $80 - 90^\circ\text{C}$. Поэтому второй уровень защиты от перегрева могут обеспечить объемные терморезисторы на основе VO_2 , расположенные на корпусе процессора.

Один из возможных вариантов двухуровневой схемы защиты процессора от перегрева с помощью критических терморезисторов на основе VO_2 , которая аппаратным путем обеспечивает перевод процессора в режим троттлинга при возникновении перегрева, показан на рис. 3. Первый уровень защиты в этой схеме обеспечивает пленочный терморезистор R_{t1} , интегрированный на кристалле процессора. Он переключается в состояние с низким сопротивлением, когда температура ядра процессора достигает $\sim 68^\circ\text{C}$. Объемный терморезистор R_{t2} , расположенный на корпусе процессора также переключается при температуре $\sim 68^\circ\text{C}$, но тогда, когда кристалл процессора нагрет до $90 - 100^\circ\text{C}$.

В штатном режиме работы процессора, когда его кристалл еще не нагрет до температуры 68°C , оба критических терморезистора находятся в состоянии высокого сопротивления R_{off} , поэтому на выходе обоих делителей уровень напряжения U^1 соответствует логической „1”. Логическая единица, поступающая на элемент „И” DD1 с делителя $R2-R_{t2}$ не блокирует опорный сигнал тактового генератора, который для разных моделей процессоров обычно имеет частоту $f_{оп} \sim 100 \div 200$ МГц [5]. Этот сигнал поступает на умножитель частоты $\times n$, где преобразуется в тактирующий сигнал ядра процессора $f_0 = n f_{оп}$. Логическая единица, приходящая с делителя напряжения $R1-R_{t1}$ на элемент „ИЛИ” DD3, блокирует передачу сигнала опорной частоты на вход элемента „И” DD2. На элемент DD2

с выхода DD3 поступает логическая „1”, разрешающая передачу тактирующего сигнала в ядро процессора, поэтому он работает на своей подлинной частоте f_0 .

Когда кристалл процессора нагревается до температуры 68°C , срабатывает первый уровень защиты, обеспечиваемый делителем напряжения $R1-R_{t1}$. Сигнал низкого уровня напряжения U^0 с выхода этого делителя, поступающий на логический элемент DD3 разрешает передачу сигнала опорной частоты $f_{оп}$ на вход DD2. Происходит амплитудная модуляция тактирующего сигнала процессора, имеющего частоту f_0 , сигналом опорной частоты $f_{оп}$. В промежутки времени, когда сигнал опорной частоты имеет низкий уровень U^0 , передача тактирующего сигнала в ядро процессора не происходит (рис. 1), то есть реализуются „холостые” такты процессора, когда он фактически находится в спящем режиме. Поскольку опорный сигнал тактового генератора имеет скважность $Q \approx 2$, то частота троттлинга $f_{тр}$ в соответствии с (1) в этом случае в два раза меньше истинной частоты процессора f_0 .

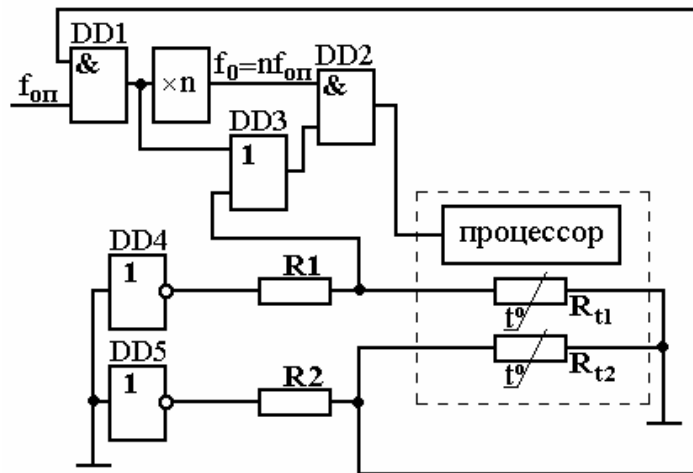


Рисунок 3 – Двухуровневая схема защиты центрального процессора компьютера от перегрева, использующая режим троттлинга

Поэтому загрузка процессора снижается до 50% и он остывает. Если температура ядра процессора снизится до значения $68^\circ\text{C} - \Delta T_t$ ($\Delta T_t \sim 3 - 10^\circ\text{C}$ ширина петли температурного гистерезиса фазового перехода металл-полупроводник VO_2) критический терморезистор R_{t1} переключается в состояние высокого сопротивления и штатный

режим работы процессора с частотой тактирующего сигнала f_0 восстанавливается.

В том случае, если после срабатывания первого уровня защиты нагрев процессора продолжается, то при температуре кристалла 90 – 100°C, терморезистор расположенный на корпусе процессора переключается в состояние низкого сопротивления. С делителя напряжения $R_2-R_{t_2}$ на элемент DD1 поступает напряжение логического нуля U^0 , которое блокирует передачу сигнала опорной частоты $f_{оп}$ в процессор. В этом случае все такты становятся „холостыми“, что значительно снижает энергопотребление и способствует эффективному охлаждению процессора.

Таким образом, критические терморезисторы на основе VO_2 позволяют с помощью простых схемотехнических решений, без привлечения программных средств, реализовать режим троттлинга процессора для обеспечения его защиты от перегрева.

ЛИТЕРАТУРА

1. Функции управления производительностью и энергопотреблением процессоров Intel Pentium 4 и Intel Xeon. Часть 2: новые процессоры, новые технологии [Электронный ресурс] / Д. Беседин // iXBT – 2004 – Режим доступа: <http://www.dvgu.ru/meteo/PC/IntelThermal-2.html>.
2. Защита процессоров AMD от перегрева (Обзор) [Электронный ресурс] / А. Карабуто // FERRA.RU – 2002 – Режим доступа: <http://www.ferra.ru/online/>
3. [system/s19535/](http://www.ferra.ru/online/system/s19535/)
4. Шефтель И.Т. Терморезисторы (Электропроводность 3d-окислов. Параметры, характеристики и области применения). – М.: Наука, 1973.–416 с.
5. Терморезистор прямого подогрева ТРП68-01 [Электронный ресурс]// Индустрон – 2007 – Режим доступа:<http://www.industron.ru/catalog/relsib/uzt/uzt.htm>.
6. М. Гук. Аппаратные средства IBM PC, С-П: “Питер”, 2006 – 1072 с.

Получено 28.10.2008г.